УДК 681.513.2

В.В. Сидоренко, проф., д-р техн. наук, Н.В. Смирнова, ас.
Кировоградский национальный технический университет

Обнаружение скачкообразного изменения среднего значения тока в системе управления процессом размерной обработки электрической дугой

Приводится решение задачи обнаружения в реальном масштабе времени скачкообразного изменения среднего значения тока на фоне белого шума в процессе размерной обработки дугой на основе критерия отношения правдоподобия Пейджа-Хинкли с целью повышения качества обработки детали.
размерная обработка дугой, система управления, обнаружение скачка, скачкообразное изменение

Вступление. Размерная обработка дугой (РОД) является процессом, основанным на использовании стационарной электрической дуги, в котором обработка деталей осуществляется в поперечном потоке жидкости – диэлектрика [1].

Стабильность величины рабочего тока дуги является одним из основных показателей качества обработки, поскольку превышение величины заданного тока приводит к увеличению диаметра эрозионных лунок, что снижает класс чистоты обработки детали.

Нестабильность величины технологического тока приводит к снижению качества и производительности процесса обработки деталей.

Известные методы стабилизации тока дуги основаны на использовании систем управления процессом обработки по отклонению с петлей обратной связи в контуре управления [2]. Информация о величине тока дуги является апостериорной. Недостатком метода в конкретной реализации является задержка времени обнаружения скачкообразного изменения тока дуги.

Более эффективным методом является метод раннего обнаружения скачкообразных изменений среднего значения тока дуги, основанных на методах математической статистики [3]. Использование критерия правдоподобия Пейджа – Хинкли [4] позволяет в реальном масштабе времени обнаружить скачкообразные изменения среднего значения тока дуги.

Постановка задачи. Пусть на входе некоторого детектора наблюдается последовательность дискретных сигналов y_n, которые возмущаются белым шумом ε_n. Т.е. сигнал представляет собой последовательность независимых гауссовских случайных величин с дисперсией и средним μ_n.

$$y_n = \mu_n + \varepsilon_n \quad . \tag{1}$$

При этом в заведомо неизвестные моменты времени происходит скачкообразное изменение среднего значения сигнала:

$$\mu_n = \begin{cases} 0, & если \quad n \le r-1, \\ 1, & если \quad n \ge r. \end{cases} , \tag{2}$$

где n - последовательность измерений;

r - момент скачкообразного изменения.

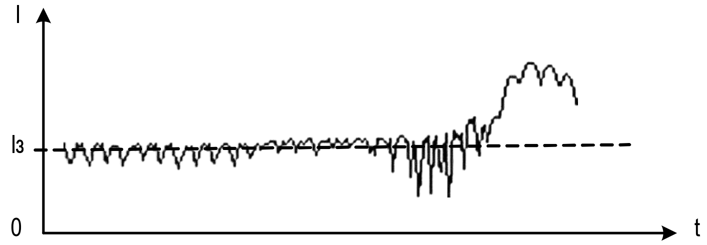

Рисунок 1 – Скачкообразное изменения тока дуги в процессе обработки детали

Задача состоит в обнаружении таких скачкообразных изменений в реальном масштабе времени. Основная проблема сводится к скорейшему обнаружению скачкообразного изменения, чтобы иметь возможность обработать данные по другим каналам. Такой детектор должен иметь показатели качества (введенные А.Н.Ширяевым):

- малое количество ошибочных тревог (т.е. нужно большое среднее время между ошибочными тревогами);
- малое запаздывание в обнаружении (показателем является среднее время запаздывания в обнаружении скачкообразного изменения сигнала).

Необходимо решить противоречие между требованием относительно малого числа ошибочных тревог и малого запаздывания в обнаружении скачкообразного изменения, поскольку уменьшение времени обнаружения приводит к увеличению вероятности появления ошибочных тревог.

Детектор называют оптимальным, если при фиксированном среднем времени между ошибочными тревогами запаздывание в обнаружении скачкообразного изменения сигнала является минимальным.

Необходимо найти критерии и алгоритмы, которые реализуют оптимальный детектор.

Анализ исследований и публикаций. В работе [3] обнаружение скачкообразного изменения сигнала осуществляется методом сегментации исследуемого сигнала.

При использовании метода предполагается, что сигнал описывается последовательными единицами, характеризуемыми некоторыми моделями. В основе метода лежит использование статистики критерия, на основе которой сравниваются две или три модели, оцененные по различным участкам сигнала, что позволяет обнаруживать скачкообразные изменения в параметрах модели.

Задача сегментации решается в три этапа:

- выбор структуры модели (модель авторегрессии АР);
- выбор статистики критерия (отношение правдоподобия);
- обнаружение изменения и оценка времени изменения.

Предполагается, что каждый сегмент сигнала описывается моделью АР порядка p, обозначаемой M(A, σ), т. е.

$$\begin{cases} y_n = \varphi_n^T A + e_n \\ \operatorname{var} e_n = \sigma^2 \end{cases}, \quad (3)$$

где A = (a_1,…,a_p) - параметры модели;
φ_n^T = (y_{n-1},…,y_{n-p}); p - порядок модели;

(e_n) - белый шум с нулевым средним и дисперсией σ^2.

Чтобы обнаружить скачкообразное изменение в параметрах модели (1), проверяются две гипотезы - альтернативы:

H_0: сигнал $[y_0,\ldots,y_n]$ описывается моделью $M_0(A_0, \sigma_0)$;

H_1: в момент времени r происходит скачкообразная смена модели, так что сигнал $[y_0,\ldots,y_r]$ описывается моделью $M_1(A_1, \sigma_1)$, а сигнал $[y_{r+1},\ldots,y_n]$ - моделью $M_2(A_2, \sigma_2)$.

Статистика критерия Брандта (4) базируется на обобщенном отношении правдоподобия (ООП) D_n между этими двумя гипотезами:

$$D_n = -(n-r)\ln\sigma_2^{\,2} - r\ln\sigma_1^{\,2} + n\ln\sigma_0^{\,2}. \tag{4}$$

Таким образом, решение о наличии скачкообразного изменения принимается, если

$$\min_{A_0,\sigma_0} \max_{\substack{A_1,\sigma_1 \\ A_2,\sigma_2}} \max_{r} D_n > D_0 \quad . \tag{5}$$

Текущее значение r определяется как аргумент выражения (5).

Обнаружение скачкообразного изменения среднего значения осуществляется также методом критерия правдоподобия:

- апостериорное обнаружение (по полной выборке): в гауссовском случае распределение вероятности оценки максимального правдоподобия r_n времени скачкообразного изменения не зависят от того, известны ли средние значения сигнала до и после скачкообразного изменения;

- последовательное обнаружение: в случае обнаружения в реальном масштабе времени резкого изменения от одного к другому двух известных законов распределения f_0 и f_θ, оптимальным детектором является критерием Пейджа – Хинкли;

- критерий кумулятивной суммы Хайнса (скользящего геометрического среднего): при известных средних μ_0 и дисперсии σ^2 до и после скачкообразного изменения разрешает вычислить пороговое значение, тем не менее не разрешает частично разделить пороги скачкообразного изменения и шума как в критерии Пейджа – Хинкли.

Решение задачи будет состоять в поиске таких статистических критериев и алгоритма, которые будут представлять собой компромисс между сложностью вычислений и надежностью диагностирования резких изменений в поведении сигнала.

Основная часть. Скачкообразное изменения тока дуги в процессе обработки детали (рис. 1) представим в виде модели поведения сигнала (рис.2):

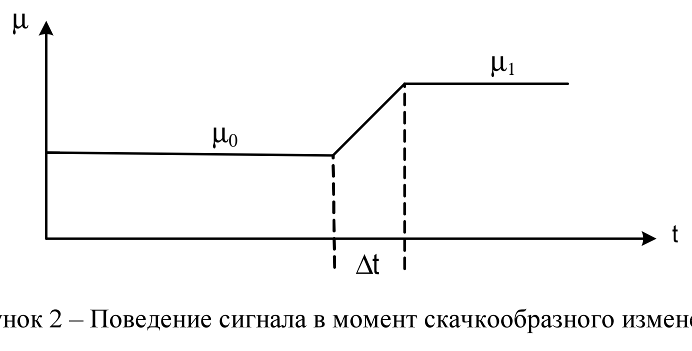

Рисунок 2 – Поведение сигнала в момент скачкообразного изменения

Обнаружение скачкообразного изменения является эквивалентом принятию гипотезы H_1 (есть скачкообразное изменение, r, n), когда она проверяется по отношению к гипотезе H_0 (нет скачкообразного изменения, r, n).

Критерий отношения правдоподобия для этих двух гипотез принимает вид:

$$\frac{\prod_{k=1}^{r-1} p_0(y_k)\cdot\prod_{k=r}^{n} p_1(y_k)}{\prod_{k=1}^{n} p_0(y_k)} = \prod_{k=r}^{n}\frac{p_1(y_k)}{p_0(y_k)},$$

где $$p_i(y_k) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\exp\left\{-\frac{(y_k-\mu_i)^2}{2\sigma^2}\right\} \qquad (i = 0,1).$$

Логарифмирование дает статистику критерия:

$$\Lambda_n(r) = \frac{\mu_1-\mu_0}{\sigma^2}\sum_{k=r}^{n}(y_k - \frac{\mu_1+\mu_0}{2} = \frac{\mu_1-\mu_0}{\sigma^2}\sum_{k=r}^{n}(y_k - \mu_0 - \frac{\mu_1-\mu_0}{2} = \frac{1}{\sigma^2} S_r^n(\mu_0,\nu), \quad (6)$$

где

$$S_r^n(\mu_0,\nu) = \nu\sum_{k=r}^{n}(y_k - \mu_0 - \frac{\nu}{2}), \quad (7)$$

$\nu = \mu_1 - \mu_0$ - величина скачкообразного изменения с учетом знака.

Величину скачкообразного изменения ν определим из условия:

$$\nu = \max_r S_r^n(\mu_0,\nu) \underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrless}} \lambda. \quad (8)$$

А.Н. Ширяев и Г. Лорден независимо друг от друга показали оптимальность этого критерия так как он минимизирует запаздывание в обнаружении при заданном среднем времени между ошибочными тревогами.

Условие (8) можно представить иначе: подавать тревогу в первый момент времени n, для которого выполняется условие:

$$g_n = S_1^n(\mu_0,\nu) - \min_{1\le k\le n} S_1^k(\mu_0,\nu) > \lambda . \quad (9)$$

Это соотношение является детектором Пейджа - Хинкли.

Величина $S_1^n(\mu_0,\nu)$ - определяется апостериорно. Величину g_n можно использовать для определения перехода сигнала из μ_0 в μ_1.

Геометрическая интерпретация алгоритмов (7) и (8) представлена на рис 3.

Рисунок 3 – Геометрическая интерпретация алгоритмов

Таким образом, на основании сигнала изменения среднего значения тока дуги система управления станком РОД выбирает ветви алгоритма работы:

– позиционирование рабочего инструмента в соответствии с программой обработки;

– изменение положения рабочего инструмента для предотвращения экстремального режима;

– изменение внутреннего сопротивления источника технологического тока и ограничение тока дуги.

Применение критерия отношения правдоподобия Пейджа – Хинкли позволяет преобразовать существующую систему управления током дуги по отклонению [2] представленную на рис. 4., в комбинированную систему управления путем введения детектора скачкообразного изменения тока дуги.

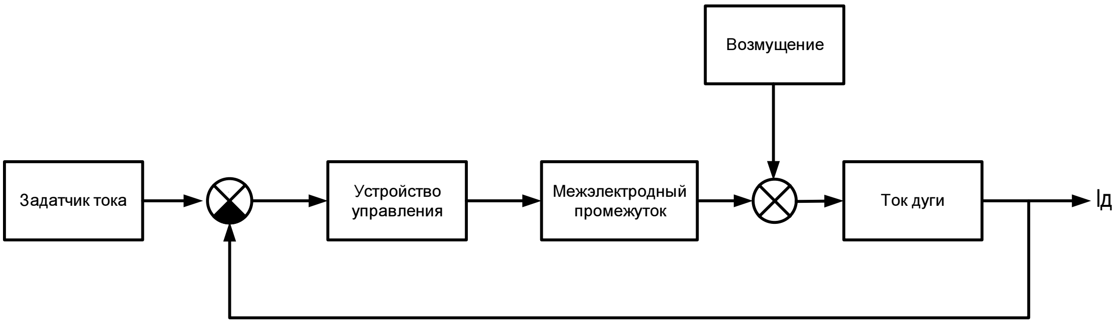

Рисунок 4 – Управление током дуги по отклонению

Структурная схема комбинированной системы управления с использованием детектора скачкообразного изменения среднего значения тока дуги представлена на рис.5.

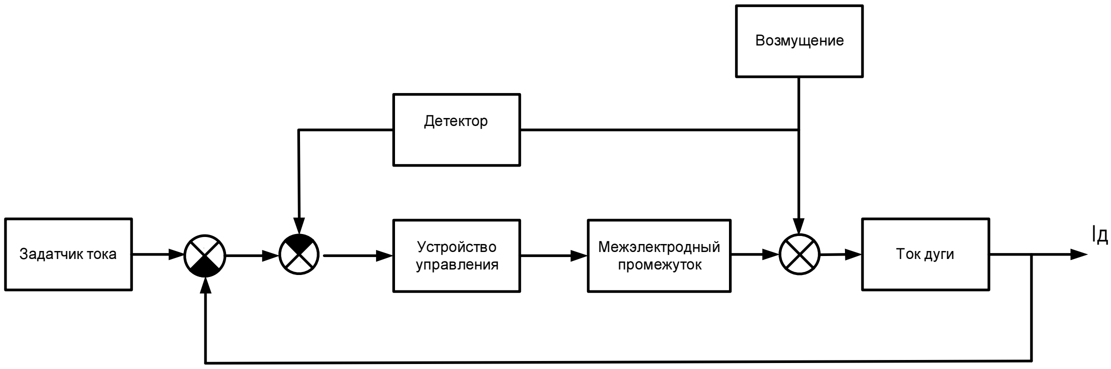

Рисунок 5 – Комбинированная система управления током дуги

Выводы

Своевременное обнаружение скачкообразного изменения среднего значения тока дуги на основе критерия Пейджа-Хинкли позволяет предотвратить развитие процесса короткого замыкания за счет формирования сигнала управления с учетом результата детектирования направления изменения тока дуги.

Это позволяет подсистеме управления процессом обработки осуществлять программное управление током дуги.

Программное управление процессом обработки детали в значительной мере повышает качество обработки деталей вследствие исключения экстремальных режимов работы станка РОД.

Список литературы

1. Носуленко В.И. Розмірна обробка металів єлектричною дугою. Автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.03.07 / Кировоградський гос. техн. ун-т – К.: 1999.- 36 с.
2. Носуленко В.І., Боков В.М., Великий П.М., Широботько В.П., Гросул І.А. Верстат електроерозійний копіювально – прошивний моделі “АМ - 1”. Технічний опис. Інструкція по експлуатації. Технічний паспорт. Кіровоград: 2004. – 61 с.
3. Бассвиль. М., Банвениста А. Обнаружение изменения свойств сигналов и динамических систем. Пер. с англ.- М.: Мир, 1989. - 278 с.
4. Hinkley D. V. Inference about the Change-Point from Cumulative Sum-Tests, Biometrika, 508, 3, p 509-523 (1971).

Приводиться рішення завдання виявлення в реальному масштабі часу стрибкоподібної зміни середнього значення струму на фоні білого шуму в процесі розмірної обробки дугою на основі критерію відношення правдоподібності Пейджа - Хинкли з метою підвищення якості обробки деталі

The task on a white noise background detection arch current average importance spasmodic change in processing by current electrical arch in real time on the of plausibility Page - Hinkley relation basis criterion with the purpose quality of processing detail increase decision is resulted.